

# РАЗВИТИЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ И ПОСТДИНАМИЧЕСКОЙ РЕКРИСТАЛЛИЗАЦИИ В МЕДИ РАЗНОЙ СТЕПЕНИ ЧИСТОТЫ ДЕФОРМИРОВАННОЙ В НАКОВАЛЬНЯХ БРИДЖМЕНА

*Покрышкина Д.К.*

*Руководитель – с.н.с., д.т.н. Дегтярев М.В.*

ИФМ УрО РАН, г. Екатеринбург, highpress@imp.uran.ru

Медь разной степени чистоты: особо чистую – 99.99%, бескислородную марки М0б (99.97%) и технической чистоты марки М1 (99.90%) деформировали сдвигом под давлением 6 ГПа с углами поворота подвижной наковальни 15, 45, 60, 90 и 180 градусов и 1, 5 и 10 оборотов. Образцы для деформации вырезали в виде дисков диаметром 5 мм и толщиной 0.3 мм. Для расчета истинной логарифмической деформации использовали формулу:

$$e = e_{\text{сдвига}} + e_{\text{осадки}} = \ln \left( 1 + \left[ \frac{\varphi * r_i}{h_{ir}} \right]^2 \right)^{0.5} + \ln \frac{h_0}{h_{ir}} \quad (1)$$

где  $\varphi$  – угол поворота наковальни,  $r_i$  – расстояние от оси вращения,  $h_0$  и  $h_i$  – толщина образца до и после деформации на соответствующем  $r_i$ .

Экспериментальная погрешность определения степени деформации составляла  $\pm 0.2$  единицы логарифмической деформации. Максимальная деформация при сдвиге под давлением достигала  $e=12$ .

Структуру исследовали с помощью электронного микроскопа JEM 200СХ на расстоянии 1.5 мм от центра образцов. Размер элементов структуры определяли по электронно-микроскопическим светлопольным и темнопольным изображениям в рефлексе (111) $_{\gamma}$  по результатам более 200 измерений с погрешностью менее 10%. С использованием программы «STATISTICA 5.5» строили гистограммы распределения элементов структуры по размерам. Определяли максимальный ( $d_{\text{max}}$ ), средний ( $d_{\text{cp}}$ ) и наиболее вероятный ( $d_{\text{вер}}$ ) размер элемента структуры, коэффициент вариации линейных размеров зерен (К).

Время после деформации до измерения твердости и исследования структуры не превышало 2-х суток.

Формирование структуры при динамической рекристаллизации (ДР) идет в соответствии с температурой и скоростью деформации, совместное влияние которых учитывается параметром Зинера-Холломона. На практике этот параметр представляют в виде:

$$\ln Z = \ln \dot{\epsilon} + \Delta H / RT, \quad (2)$$

где  $\dot{\epsilon}$  – истинная скорость деформации,  $\text{с}^{-1}$ ;  $\Delta H = 107$  кДж/моль – энергия активации высокотемпературной деформации, для чистых металлов ее

значение близко к энергии активации самодиффузии;  $R$  – газовая постоянная;  $T$  – температура деформации, 300К.

Скорость деформации рассчитывали по формуле:

$$\dot{\epsilon} = \Delta \epsilon / \Delta \tau \quad (3)$$

где  $\Delta \epsilon$  – деформация, при которой произошло изменение структуры по сравнению с образцом, деформированным с меньшим углом поворота наковальни,  $\Delta \tau$ , с – время, за которое достигается соответствующее приращение степени деформации.

Расчет температурно-скоростных условий деформации показал (рис.1), что при увеличении угла поворота наковальни, независимо от содержания примесей, последовательность процессов была одинаковой: деформационное упрочнение почти по всей площади образцов, деформированных с углом поворота наковальни  $15^\circ$  ( $\ln Z > 42$ ), появление первых ДР зерен после поворота наковальни на  $45^\circ$  ( $\ln Z < 42$ ), переход на стадию развитой ДР после 10 оборотов наковальни ( $\ln Z < 38$ ).

После деформации с углом поворота  $180^\circ$  процессы деформационного упрочнения и динамической рекристаллизации развиваются в равной степени  $\ln Z = 40$  (рис.1). Исследовали состояния, полученные в условиях  $\ln Z = 40$  и  $\ln Z < 38$ .

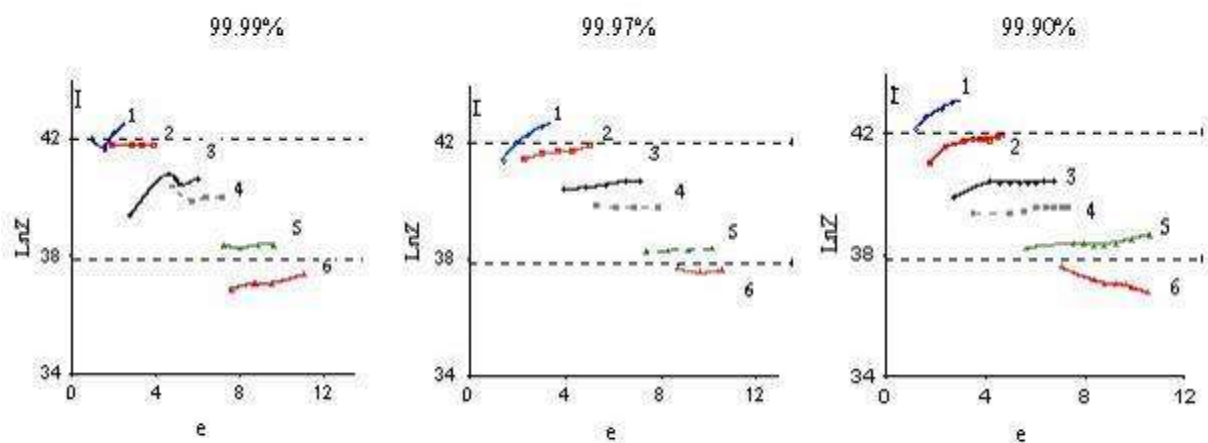


Рис.1 Температурно-скоростные условия деформации меди разной степени чистоты, деформированной с углом поворота 1 –  $15^\circ$ , 2 –  $45^\circ$ , 3 –  $180^\circ$ , 4 – 1 оборот, 5 – 5 оборотов, 6 – 10 оборотов

В структуре меди, независимо от степени чистоты и условий деформации, наблюдаются как наклепанные зерна, так и зерна свободные от дислокаций (рис.2). Зерна свободные от дислокаций часто имеют правильную форму: тонкие прямые границы и уравновешенные тройные стыки. Это совершенствование могло произойти только по окончании деформации в ходе постдинамической рекристаллизации (ПДР). После деформации при  $\ln Z = 40$  зерен способных к росту при ПДР мало, они имеют возможность, не сталкиваясь с другими зернами, вырасти до значительных размеров, и не приобретают геометрически правильную

форму (рис.2 а-в). Размеры ПДР зерен определяются содержанием примесей. В результате развивается значительная размерная неоднородность структуры: коэффициент вариации линейных размеров составляет  $K=2$  для чистой меди, и  $K=1$  для меди с наибольшим содержанием примесей.

На стадии развитой ДР (рис.2 г-е) плотность способных к росту зерен велика и их взаимное столкновение обуславливает правильную геометрическую форму и заметно меньший размер наиболее крупных зерен, который не зависит от содержания примесей в материале. Сохраняется размерно-однородная структура ( $K=0.5-0.6$ ).

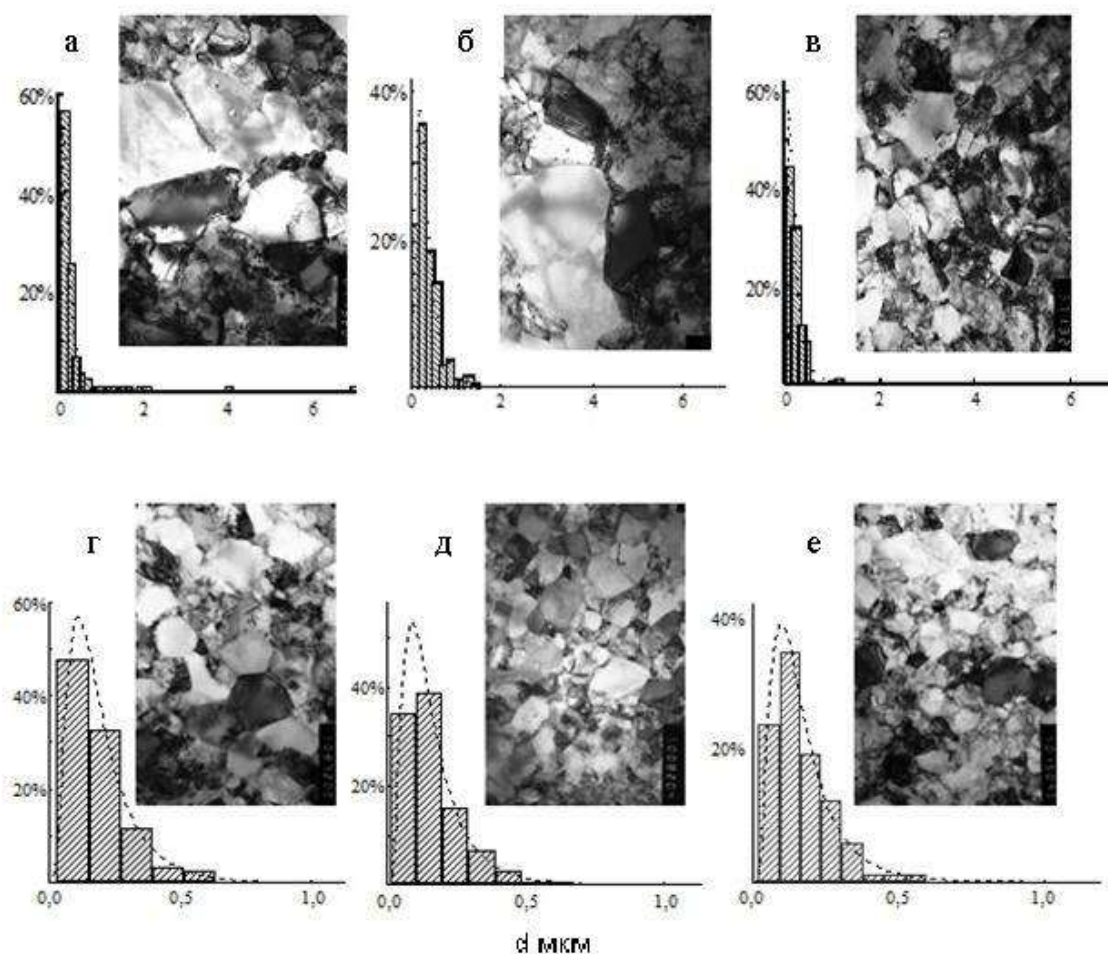


Рис.2 Гистограммы распределения элементов структуры по размерам и микроструктура меди чистой а,г – 99.99%, б,д – 99.97%, в,е – 99.90%, деформированной сдвигом под давлением на  $180^\circ$  (а-в) и 10 оборотов (г-е)

Работа выполнена при частичной поддержке программы Президиума РАН № 09-П-2-1025. Электронно-микроскопическое исследование выполнено в ЦКПЭМ ИФМ УрО РАН.